

LY12-CZ 和 LC4-CS 铝合金在多种环境中的腐蚀疲劳裂纹扩展

苏晓燕 郭洪全 李谦
(北京航空材料研究所)

曹定国
(水上飞机设计所)

文中对两种常用铝合金 LY12-CZ 和 LC4-CS 在各种环境中的疲劳裂纹扩展速率与实验室空气中的数据进行比较, 揭示了不同的腐蚀环境对疲劳裂纹扩展速率的影响。腐蚀环境的参加使两种铝合金的裂纹扩展速率明显加快, 其影响的严重程度由重到轻依次为: 盐水, 盐雾, 盐雾+SO₂, 潮湿空气。LC4-CS 合金比 LY12-CZ 合金对环境因素表现更为敏感, 其疲劳裂纹扩展抗力在腐蚀环境中的降低更为显著。

Corrosion Fatigue Crack Growth of Aluminium Alloys LY12-CZ and LC4-CS in Various Environments

Su Xiaoyan Guo Hongquan Li Qian
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)
Cao Dingguo
(Institute of Hydroplane Design)

The crack growth data in corrosive environments were compared with the crack growth data in lab air. The results showed the significant effects of various environments on the fatigue crack growth. The interactions of aggressive environments with fatigue loads caused the accelerations of fatigue crack growth rates in aluminium alloys LY12-CZ and LC4-CS. Among the environments tested the most detrimental one was salt water, which was followed by fog, fog+SO₂, and moist air. Compared with alloy LY12-CZ, Alloy LC4-CS was much more susceptible to the environments tested. And the resistance to fatigue crack growth was reduced substantially in corrosive environments.

一、引言

飞机在实际使用中, 会遇到多种有害环境, 如湿空气、海水、盐雾、大气中的工业污染物及来自机舱内的污染源, 如箱水及污染环境的运载物等。随着现代航空事业的发展, 对飞机结构的耐久性和可靠性的要求日益提高。因而, 在飞机结构完整性设计, 包括定寿以及确定检修周期等方面, 必须包括环境影响因素。飞机材料的腐蚀疲劳性能是进行可靠性和耐久性分析不可缺少的基础, 同时也直接关系到发展材料的抗腐蚀疲劳性能和腐蚀疲劳控制技术的发展。

二、试验程序

1. 材料和试样

材料为 Al-Cu-Mg 系合金 LY12-CZ 和 Al-Zn-Mg-Cu 系合金 LC4-CS 包铝板, 名义厚度为 3mm。试样为中心裂纹拉伸试样 (CCT), 宽度为 160mm, 中心线切割缺口长度 $2a_0 = 9\text{mm}$, 试样取向为 L-T 方向。材料的化学成分符合 GB3190-82 标准。力学性能列入表 1。

2. 试验频率和载荷

试验在 MTS810 液压伺服试验机上进行, 应力比 $\sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.1$, 恒幅加载。本次试验在所有腐蚀环境中的试验频率均定为 10Hz。而实验室空气中的试验频率为 20~30Hz。

3. 试验环境

1) 实验室空气

温度为 $20 \pm 4^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $\text{RH} = 30\% \sim$

表 1 LY12-CZ 和 LC4-CS 的力学性能

合金性能	$\sigma_{0.2}(\text{MPa})$	$\sigma_b(\text{MPa})$	E(GPa)	$\delta_{10}(\%)$	热处理
LY12-CZ	362	464	68	15.42	固溶处理+自然时效
LC4-CS	526	579	67.7	10.1	固溶处理+人工时效

40%。

2) 潮湿空气

在温度为 20~25℃ 时, 采用水分蒸发法将介质盒内的相对湿度控制在 80~85% 之内。在试验全过程中用电子干湿度计测量相对湿度。

3) 盐水

盐溶液为含 3.5%NaCl 去离子水溶液。试验段完全浸没于盐溶液中, 溶液为连续循环式。参照美国海水介质疲劳裂纹扩展试验标准, 在试验中随时测量 pH 值, 并按期更换溶液。所测 pH 值在 6.85~9.3 之间波动。

4) 盐雾

由 3.5%NaCl 盐水雾化而成, 并参考 ASTM B117-85 盐雾试验标准, 对盐雾沉积量进行控制, 其值为 1~2ml/80cm·h, 即在 80cm 的水平收集面上, 盐雾凝结液量为每小时 1~2ml, 取 16 小时的平均值。

盐雾为连续不循环式, 由介质盒一端进入另一端排出。在试验中记录温度、雾化前溶液和凝结液的 pH 值。

5) 盐雾+SO₂

盐雾同上。SO₂ 通过内含 5000ppm SO₂ 的, 其余为氩气的 2 升气瓶供给。SO₂ 随盐雾一起流过介质盒, 其浓度通过调节流量进行控制, 所测 SO₂ 含量值约为 8.7mg/m³。

三、试验结果和讨论

1. 盐水环境中的疲劳裂纹扩展

LY12-CZ 和 LC4-CS 在 3.5%NaCl 盐水中的裂纹扩展速率数据示于图 1。在低 ΔK 范围内, 盐水对 LY12-CZ 合金的裂纹扩展速率影响明显。当 ΔK 为 200N/mm^{3/2} (约 6.3MPa√m)。盐水中的扩展速率是空气中的 3.0 倍, 而后其影响逐渐减弱。当 ΔK 约为 500N/mm^{3/2} 时 (15.8MPa√m), 两者趋于一致, 此时裂纹扩展行为主要由力学因素控制

由图 1 明显可见, 同样的盐水环境对 LC4-CS 合金的影响显著加大, 在相当宽的 ΔK 范围内, 130~500N/mm^{3/2} (4.1~15.8MPa√m), 其裂纹扩展速率为空气中的 3.6~4.2 倍。直至 ΔK 约为 800N/mm^{3/2} (25.3MPa√m), 才加入空气中的数据。盐水腐蚀环境对 LC4-CS 合金疲劳裂纹扩展抗力的降低作用相当显著。

2. 盐雾中的疲劳裂纹扩展

两种铝合金在盐雾中的疲劳裂纹扩展速率与空气中相比, 其趋势与盐水试验相同, 但均低于各自在盐水中的加速幅度。LC4-CS 仍然是在相当宽的 ΔK 范围内对环境很敏感, 而 LY12-CZ 则在低 ΔK 区表现敏感, 如图 2 所示。

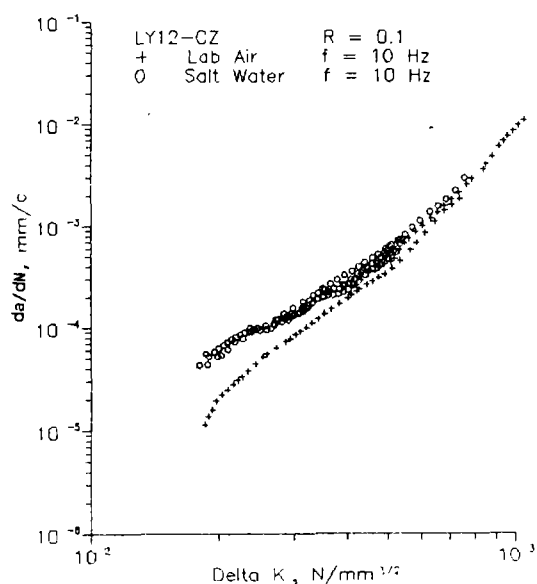
盐溶液在雾化前的 pH 值在 6.6~7.13 之间波动, 平均值为 6.84。雾化后, 由于溶液中二氧化碳的损失, 收集的凝结液的 pH 值在 7.03~7.48 之间, 平均值为 7.19。

3. 盐雾+SO₂ 的疲劳裂纹扩展

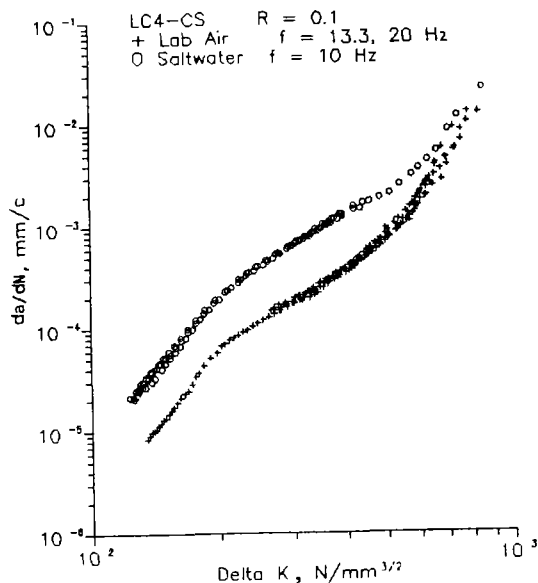
大气中的工业污染物已成为环境影响中的重要因素, 如 SO₂、H₂S 等。在本次试验中, 所加 SO₂ 的浓度约为 8.7mg/m³, 通入盐雾中与之同连续流过试验段。

雾化前盐溶液 pH 的平均值为 6.84, 而雾化后则在 4.1~5.8 之间, 酸度提高。显然, 由于在盐雾中加入 SO₂ 会生成亚硫酸和硫酸, 从而使酸度提高。一般认为介质的酸度越高, 腐蚀越重。然而, 本次试验的一个有趣现象是添加 SO₂ 后, 疲劳裂纹扩展速率却略低于在纯盐雾中的速率, 如图 3 所示。虽然降低的幅度并不大, 但其趋势是明显的, 特别是对 LY12-CZ 合金。

不同的 SO₂ 含量, 很可能引起完全不同的结果, 作者在盐雾中添加 0.4mg/m³ 二氧化硫的试验中, 观察到 LY12-CZ 合金的裂纹扩展速率要高于添加 8.7mg/m³ SO₂ 时的速率。不同的含量很可能存在一个从提高裂



(a) LY12-CZ 合金



(b) LY4-CS 合金

图 1 在实验室空气和 3.5%NaCl 盐水中的疲劳裂纹扩展速率比较

纹新鲜表面活性到降低其活性,甚至引起一定程度钝化的

转变过程,对其原因尚待进一步探讨。

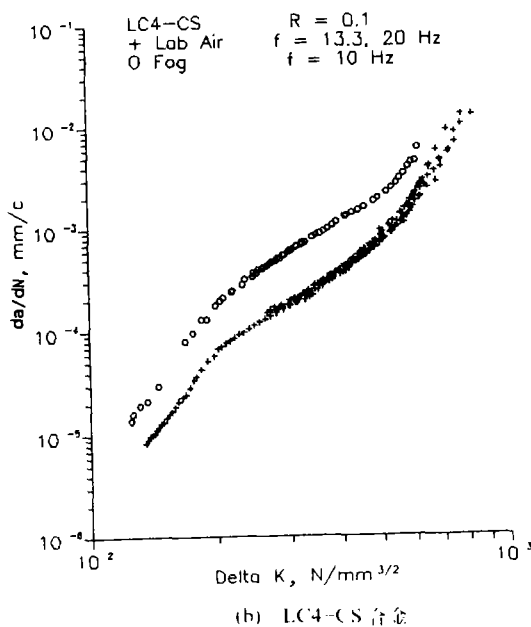
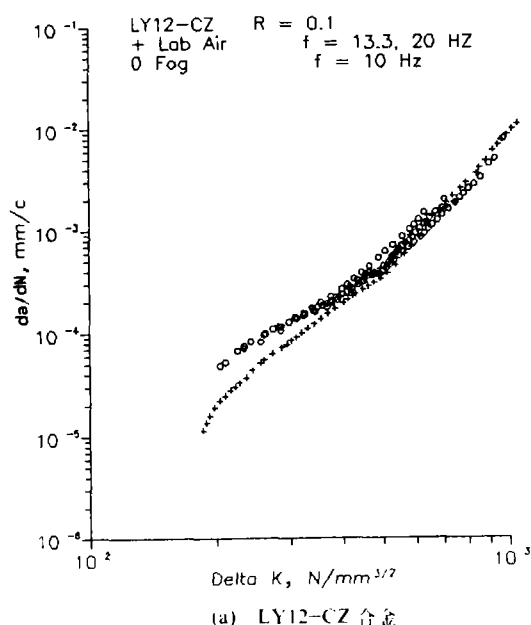


图2 试验室空气和盐雾中的疲劳裂纹扩展速率比较

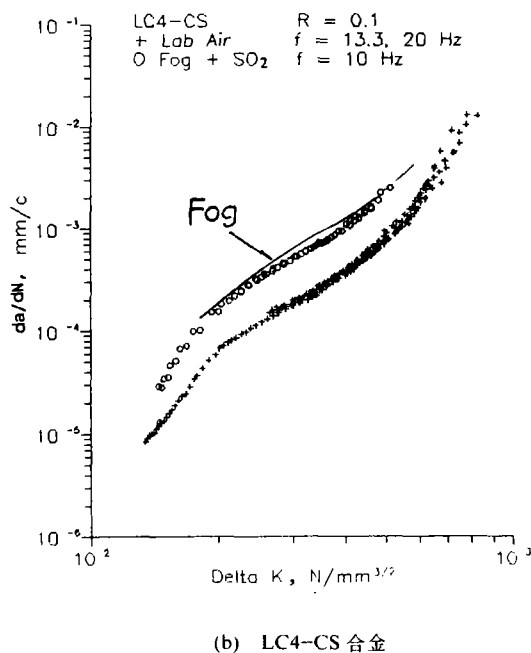
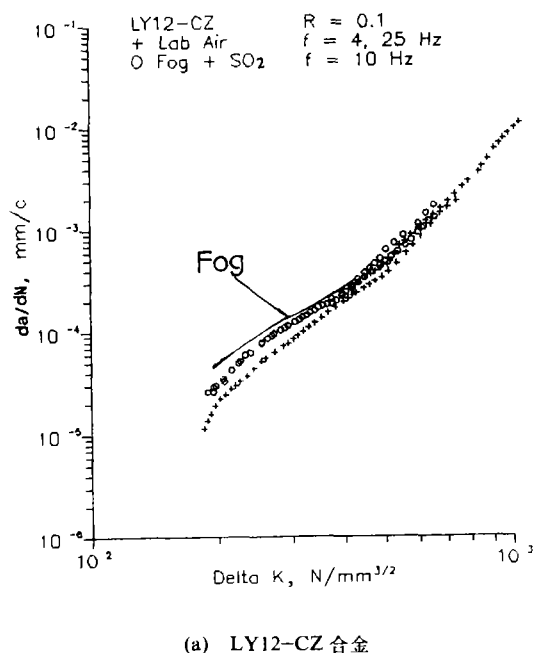


图3 在盐雾+SO₂中的疲劳裂纹扩展速率

4.在潮湿空气中的疲劳裂纹扩展

试验温度为 20~25℃, 相对湿度控制在 80~85% 之间, 试验结果示于图 4, 潮湿空气的参加并不改变 LY12-CZ 合金的裂纹扩展速率。而湿空气则使 LC4-CS 合金疲劳裂纹扩展抗力的降低十分显著。

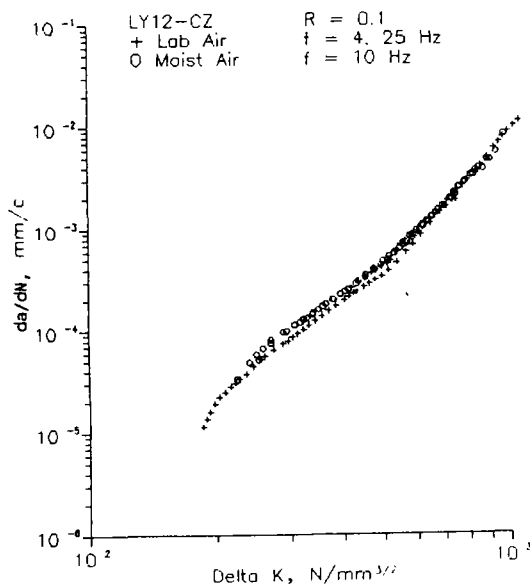
5.在各种环境中疲劳裂纹扩展性能的比较

在相同 ΔK 下, $\Delta K = 200 \text{ N/mm}^{3/2}$ 和 $\Delta K = 400 \text{ N/mm}^{3/2}$ 的疲劳裂纹扩展速率相对于空气中速率 $(da/dN)_e / (da/dN)_a$ 的倍数来表示腐蚀影响的大小, 在相同裂纹扩展速率下, $da/dN = 1\text{E-}4 \text{ mm/cycle}$ 和 $da/dN = 1\text{E-}3 \text{ mm/cycle}$

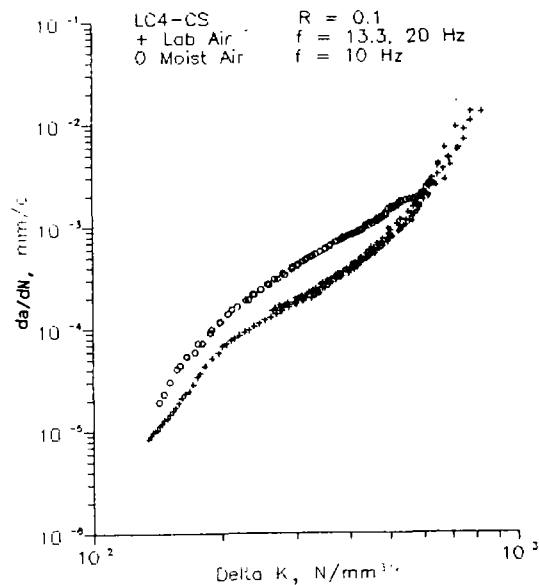
所对应的腐蚀环境中的 ΔK 与空气中的 ΔK 之比值 $(\Delta K_e / \Delta K_a)$ 来说明疲劳裂纹扩展抗力的改变。可使各种环境的影响程度一目了然, 其值均列入表 2 和表 3。显然, 腐蚀环境对疲劳裂纹扩展影响的严重程度, 由重至轻依次为盐水、盐雾、盐雾+SO₂、潮湿空气。

四、结 论

1. 腐蚀环境的参与, 使所试两种铝合金的疲劳裂纹扩展速率不同程度地成倍加速, 再次证实了在飞机耐久性和可靠性设计中必须考虑环境因素。



(a) LY12-CZ 合金



(b) LC4-CS 合金

图 4 在潮湿空气中的疲劳裂纹扩展速率

表 2 不同环境对 LY12-CZ 合金疲劳裂纹扩展影响的数值比较

试验环境	$da/dN_E / da/dN_A$ ($\Delta K = 200 \text{ N/mm}^{3/2}$)	$da/dN_E / da/dN_A$ ($\Delta K = 400 \text{ N/mm}^{3/2}$)	$\Delta K_E / \Delta K_A$ ($da/dN = 1 \times 10^{-3} \text{ mm/c}$)	$\Delta K_E / \Delta K_A$ ($da/dN = 1 \times 10^{-4} \text{ mm/c}$)
盐 水	3.00	1.40	0.96	0.76
盐 雾	2.29	1.26	1	0.81
盐雾+SO ₂	1.57	1.15	1	0.86
潮湿空气	1	1	1	1

表 3 不同环境对 LC4-CS 合金疲劳裂纹扩展影响的数值比较

试验环境	$da/dN_E / da/dN_A$ ($\Delta K = 200 \text{ N/mm}^{3/2}$)	$da/dN_E / da/dN_A$ ($\Delta K = 400 \text{ N/mm}^{3/2}$)	$\Delta K_E / \Delta K_A$ ($da/dN = 1 \times 10^{-3} \text{ mm/c}$)	$\Delta K_E / \Delta K_A$ ($da/dN = 1 \times 10^{-4} \text{ mm/c}$)
盐 水	3.65	3.78	0.66	0.69
盐 雾	2.97	3.25	0.70	0.72
盐雾+SO ₂	2.75	2.8	0.74	0.72
潮湿空气	1.98	2.24	0.82	0.79

2.不同的环境-材料作用系统,对疲劳裂纹扩展抗力的降低有程度不同的影响。所试两种铝合金与实验室空气比较,环境影响的严重程度依次为:盐水,盐雾,盐雾+SO₂,潮湿空气。

3.LC4-CS 合金比 LY12-CZ 合金对各种环境的反应更为敏感,环境对 LY12-CZ 合金的影响突出表现在低应力强度因子幅范围内,而后逐渐减弱。而对 LC4-CS 合金

则在一个很宽的应力强度因子幅范围内影响都很显著,其抗疲劳裂纹扩展性能在腐蚀环境中严重降低。

致谢:

本文作者诚挚地感谢王连玉、迟心莹、聂磊、薛建高在疲劳试验中的辛勤工作,以及侯素娥对 SEM 分析的大力协助。

(参考文献略)

航空理化检测第一期光谱分析

Ⅱ级人员培训班结业

受航空航天工业部理化检测认证评审委员会、分析化学检测人员资格鉴定委员会委托,由成都发动机公司承办的首期航空光谱分析Ⅱ级人员培训考核班近日在成都结业。

在一个月的培训中,由航空航天工业部北京航空材料研究所、西安发动机公司和成都发动机公司已取得了Ⅲ级资格的人员组成考核组,对学员进行了系统理论教学和实际操作指导,并按航空工业标准《航空分析化学检测人员的资格鉴定》(HB5459-90)进行了严格的考核。来自部内 29 个厂、所的 46 名

学员参加了培训,考核合格的同志经部分析化学检测人员资格鉴定委员会审核后,将取得该部第一批光谱分析Ⅱ级人员资格证书。

四川地区航空理化检测认证评审委员会副主任、成都发动机公司副总经理黄麟兼和成都发动机公司副总工程师潘克强等出席结业典礼,他们对培训班所取得的成绩给了高度评价,并指出它对我国航空工业光谱分析水平的提高具有深远的实际意义。

(徐忠杰)